

## 天线罩瞄准误差的建模和补偿方法

管俊琦<sup>1</sup>, 曹旭东<sup>2</sup>, 冯振明<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 中航工业空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 研究了天线罩瞄准误差斜率对于雷达型导弹制导系统稳定性和脱靶量的影响, 讨论了天线罩瞄准误差斜率的建模, 根据已有建模方法的优缺点, 提出用数据表格来描述俯仰、偏航平面上的天线罩瞄准误差, 在此基础上进行查表法补偿, 并通过数学仿真测试了该补偿方法, 补偿精度满足要求。

**关键词:** 导弹; 天线罩瞄准误差; 天线罩瞄准误差斜率; 补偿方法; 仿真

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2011)01-0066-03

## Modeling and Compensation Method of Missile Radome Error

GUAN Junqi<sup>1</sup>, CAO Xudong<sup>2</sup>, FENG Zhenming<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Airborne Missile Academy, AVIC, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** Radome error's negative effect on middle to high attitude stability and miss distance of radar homing missiles was introduced. The modeling of radome error slope was discussed. Considering the advantages and disadvantages of the existed modeling method, it was proposed to use data table to specify radome error of cross planes, and a lookup-table compensation method based on this model was used to solve the boresight error problem. Simulations were carried out and demonstrated that the stability and accuracy of missiles were improved significantly.

**Key words:** missile; radome error; radome error slope; compensation method; simulation

### 0 引言

天线罩在保护天线的同时, 对天线辐射的电磁波产生反射和折射, 引起天线主波瓣电轴偏移, 从而产生瞄准误差<sup>[1]</sup>。瞄准误差是位标器角的函数, 瞄准误差斜率为瞄准误差对位标器角的导数。文献[2]表明, 天线罩瞄准误差斜率会改变最小脱靶量对应的最佳制导时间常数, 对导弹制导系统的稳定性有较大影响, 会引起脱靶量的增大。在已有研究中, 文献[3]通过提高导引控制系统的稳定裕度来弥补由天线罩瞄准误差斜率造成的裕度损失, 但是, 这样会牺牲导弹机动性能。文献[2]假设瞄准误差斜率为常数, 设计线性滤波器来估计其值, 或者通过加入一个抖动信号, 并经过设计滤波器回路<sup>[4]</sup>来提取天线罩瞄准误差斜率。文献[5]将滤波器回路改进为扩展卡尔曼滤波方法。以上方法认为瞄准误差斜率为常数, 且只考虑一个扫描平

面, 对实际情况的描述不够精确。本文考虑俯仰、偏航两个平面的瞄准误差, 提出了较为符合实际的瞄准误差斜率模型和补偿方法。

### 1 天线罩瞄准误差影响分析与建模

天线扫描的俯仰平面, 如图1所示。

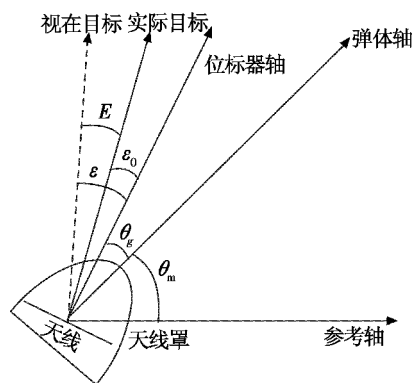


图1 天线罩瞄准误差

Fig.1 Radome boresight error

图1中:  $\theta_m$  为导弹弹体与大地参考轴的夹角;  $\theta_g$  为位标器与弹体轴的夹角;  $\epsilon_0$  为实际的失调角;  $\epsilon$  为天

收稿日期: 2010-03-22

修回日期: 2010-04-29

作者简介: 管俊琦(1986—), 男, 江西于都人, 硕士生, 主要研究方向为信息与信号处理。

线罩折射作用后的失调角。因此,视在目标与实际目标的角度差为瞄准误差  $E = \varepsilon - \varepsilon_0$ 。定义瞄准误差斜率为

$$\dot{E} = \frac{dr}{d\theta_h} \quad (1)$$

则可以建立简化的角跟踪回路模型,如图2。天线罩的折射作用在制导回路中建立了一个不需要的反馈路径,且反馈的极性和大小与误差斜率有关,从而可能引起系统不稳定。文献[6]表明,对于采用比例导引的制导系统,稳定性条件由下式表示:

$$-0.79 < \frac{NV_c \dot{E} T_\alpha}{V_m T_G} < 2.07 \quad (2)$$

式中: $N$ 为有效导航比; $V_c$ 为接近速度; $V_m$ 为导弹速度; $T_G$ 为制导时间常数; $T_\alpha$ 为转弯速率时间常数, $T_\alpha$ 与空气密度成反比,因此,随着导弹飞行高度增加, $T_\alpha$ 增大,就难以满足稳定性条件。可见,天线罩瞄准误差斜率影响着导弹中、高空的弹道稳定性,导弹的作战高度越高,要保持制导系统的稳定,则要求天线罩瞄准误差斜率值越小。

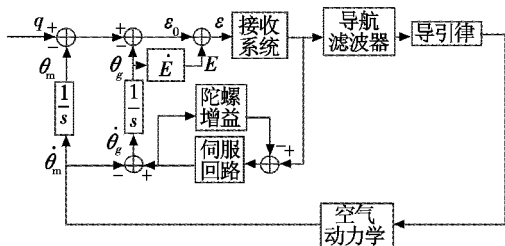


图2 简化的角跟踪回路

Fig. 2 Abbreviated angle tracking loop

导弹脱靶量与许多因素有关,但两个最基本的因素是目标的机动与角闪烁<sup>[7]</sup>。对采用比例导引制导的导弹,当制导时间常数较小时,因闪烁引起的脱靶量将增大;当制导时间常数变大时,因目标机动引起的脱靶量将增大。因此,存在着一个最小脱靶量对应的最佳制导时间常数设计问题。但是,天线罩误差斜率的存在将使制导时间常数发生改变。负的斜率减小了有效制导时间常数;正的斜率增大了有效制导时间常数。无论哪一种情况,都会改变最小脱靶距离对应的最佳制导时间常数设计,从而引起脱靶量的增大,而负的天线罩误差斜率对稳定性造成的影响更严重<sup>[8]</sup>。在天线的俯仰平面和偏航平面上均存在这样的现象。

为了描述由于瞄准误差引起的脱靶量增大现象,考虑弹目的相对运动,在对抗空战条件下,双方飞机的机动有两种选择:对敌机实施瞄准攻击;逃避敌机的攻击,即逃逸<sup>[9]</sup>。考虑在俯仰平面上的情况,假设目标向如图3的方向逃逸,以大地为坐标系,其中 $V_m$ 为导弹的速度, $V_t$ 为目标的速度, $\theta_m(t)$ 为导弹速度矢量相对

于地面的角度, $\theta_t(t)$ 为目标速度矢量相对于地面的角度。

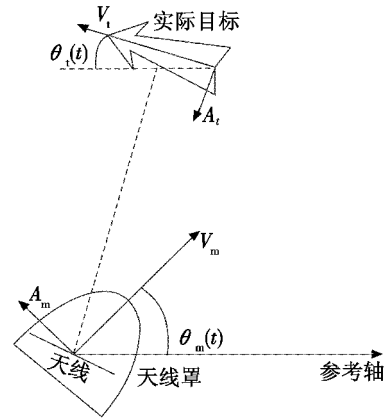


图3 弹目运动参数

Fig. 3 Motion parameters of the missile and target

瞄准误差是由电磁信号在发送或接收过程中通过不同的介质,信号在进入导引系统之前就发生折射或反射而引起的,因此当天线指向不同角度时,电磁波经过的介质厚度、角度各不相同,造成的信号畸变也不同,从而使得 $E$ 与 $\theta_h$ 不是线性关系,即 $\dot{E}$ 不是常数。为了更精确地描述瞄准误差,采用测量方式获得天线罩瞄准误差,方法如下:

- 1) 计算单脉冲天线的和-差方向图,计算差方向图零点位置;
- 2) 在规定的天线扫描角范围( $0^\circ \sim 45^\circ$ )内,每隔 $2.5^\circ$ ,计算带罩天线差方向图的零点位置;
- 3) 带罩进行实验,比较带罩与无罩时天线差方向图的零点位置,可得到天线罩在某个位标器角上的瞄准误差。

在不同的平面上重复以上实验,得到一组瞄准误差值。随后,采用“平均误差斜率”的概念,即采用规定间隔角度范围内的斜率平均值表征天线罩的误差斜率<sup>[10]</sup>。

图4为典型的俯仰平面瞄准误差的测量值平均值曲线<sup>[11]</sup>。

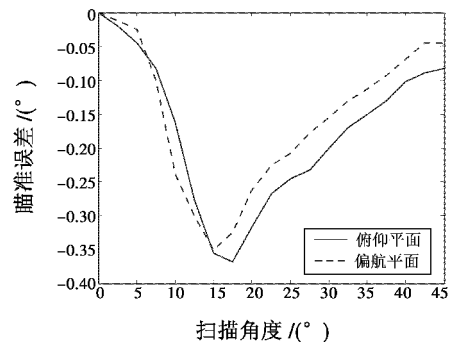


图4 瞄准误差平均值曲线

Fig. 4 Average radome error

图 5 为对应的天线罩瞄准误差斜率的平均值曲线。

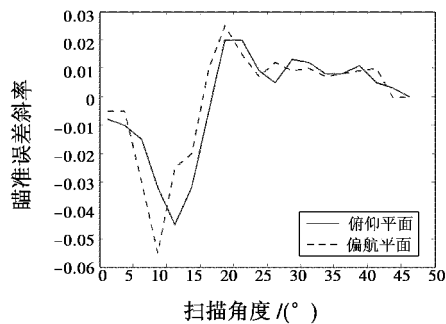


图 5 瞄准误差斜率平均值曲线  
Fig.5 Average radome error slope

## 2 补偿方法与系统仿真

考虑俯仰、偏航平面的天线罩瞄准误差,在角跟踪回路中加入查表模块,存入测量得到的瞄准误差数据表格,即瞄准误差与两个平面上的位标器角的关系为

$$\dot{E} = f(\theta_{e1}, \theta_{e2}) \quad (3)$$

并根据输入的位标器角通过线性中插查得实时的瞄准误差,并加以扣除,如图 6。

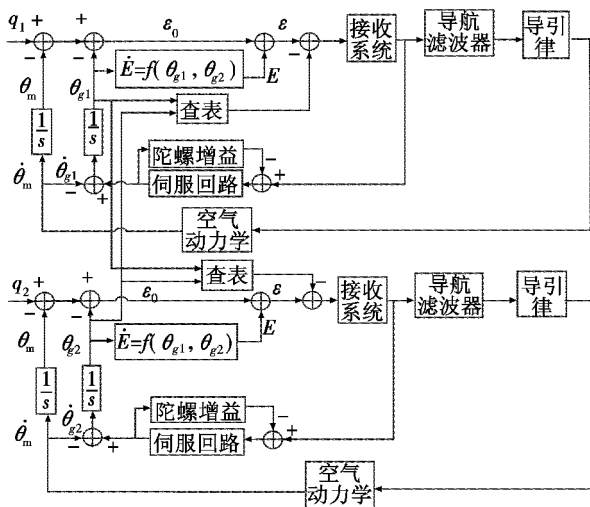


图 6 经过补偿的角跟踪回路

Fig.6 Compensated angle tracking loop

在角跟踪回路中加入弹目运动模块,扩充如图 7。

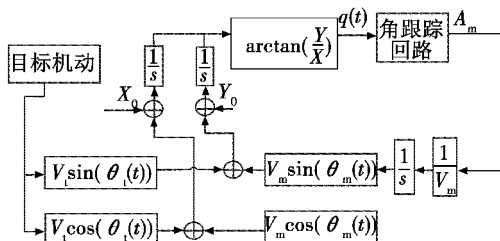


图 7 系统总体结构

Fig.7 Construction of the simulation system

图 7 中  $X, Y$  为导弹、目标之间的水平、垂直距离。使用 Matlab/Simulink 对图 7 所示系统进行仿真,仿真条件为:  $V_m = 700 \text{ m/s}$ ,  $V_t = 400 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 8000 \text{ m}$ ,  $Y_0 = 2000 \text{ m}$ 。测量  $Y$  值以衡量脱靶量的大小。

以俯仰平面为例,存在瞄准误差时,角跟踪回路输出的俯仰角速度信号见图 8。此时脱靶量为  $MD = 28.96 \text{ m}$ 。

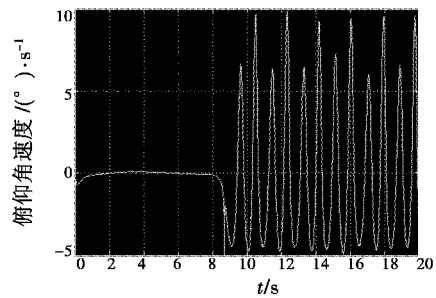


图 8 补偿前角速度信号

Fig.8 Angular velocity signal before compensation

补偿后,角跟踪回路输出俯仰角速度信号如图 9。此时脱靶量为  $MD = 0.022 \text{ m}$ 。可见,在按照表格数据进行补偿后,系统稳定性得到提高,脱靶量得到有效降低。

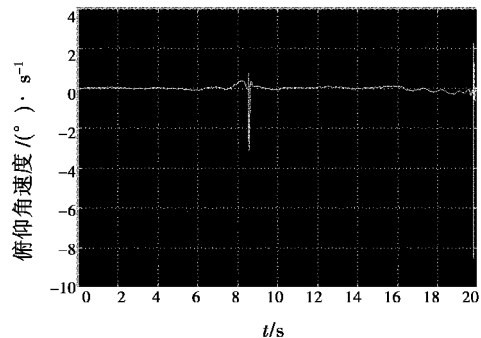


图 9 补偿后角速度信号

Fig.9 Angular velocity signal after compensation

考虑到同一批天线罩的规格类似,在瞄准误差的公差为 10% 时,进行补偿方法的仿真,角跟踪回路输出的俯仰角速度信号见图 10,此时脱靶量为  $MD = 0.40 \text{ m}$ 。

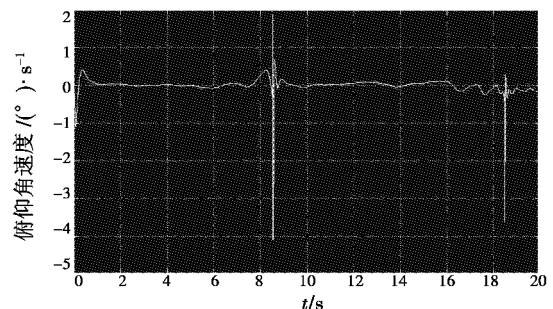


图 10 补偿后(考虑公差)角速度信号

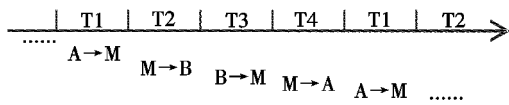
Fig.10 Angular velocity signal after compensation with consideration of tolerance

可见,在考虑实际的情况下,按照表格数据进行补

(下转第 72 页)

地传输数据。利用 Bus Hound 软件进行多次测试,测得其传输速率在 3 ~ 5 MB/s 之间。

由于 USB2.0 的数据传输速率受多种因素制约,USB2.0 的传输速率并不稳定,也不会很快,一般认为在 15 ~ 25 MB/s 左右较为合理<sup>[5]</sup>。为分析通信协议的数据传输速率,根据 USB 转发层的工作过程,用图 4 表示两台 USB 设备与主机端从属进程之间的数据传输过程。



注: A 为发送端; B 为接收端; M 为主机端从属进程; T1 ~ T4 为数据传输的 4 个时序,长度等效于一次 USB2.0 的数据传输时间; T1, T2 为数据阶段; T3, T4 为握手阶段。

图 4 两台 USB 设备互连通信数据传输过程

Fig. 4 Data transmission of two USB devices

由图 4 可见,如果不考虑通信协议的开销,协议的数据通信速率是 USB2.0 传输速率的 1/4,约为 3.75 ~ 6.25 MB/s,这与上面利用 Bus Hound 测试的结果相吻合。

## 4 结束语

基于 USB 系统和主机转发的方式实现 USB 设备的互连通信屏蔽了 USB 总线协议和硬件实现细节,使 USB 转发层不必了解底层的工作原理而专注于本层协议的实现。实践证明,该方法能方便可靠地实现 USB 设备的通信,适用于传输速率在 3 ~ 5 MB/s 的协同测

试场合。

## 参考文献

- [1] 张波,刘志勤,张龙. 基于 USB 接口的数据采集设备[J]. 电光与控制,2006,05:90-93.
- [2] 李英伟,王成儒,练秋生,等. USB2.0 原理与工程开发[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 钱峰. EZ-USB FX2 单片机原理、编程及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [4] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [5] 刘思久,赵蔚. 实现 USB2.0 高速数据传输的问题探讨[J]. 计算机工程与应用,2007,43(2):75-77.
- [6] 刘宏伟,郑立云. USB2.0 传输类型分析[J]. 计算机工程与设计,2005,26(7):1823-1826.
- [7] 阳柳,罗宇. 基于服务器转发的支持多种通信方式的通信协议[J]. 计算机工程,2003,29(9):108-109.
- [8] 范贵成,王晨旭,喻明艳. USB OTG 双模控制器主从控制状态机的设计[J]. 微电子学与计算机,2007,24(3):145-148.
- [9] 肖远军,方勇,周安民,等. 基于 USB2.0 接口的单向数据传输系统设计[J]. 计算机应用,2006,26(6):1490-1495.
- [10] 董延军,康华,张晓斌. 基于 MPC860 的 USB 通信接口设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2007,15(12):1838-1840.
- [11] Universal serial bus specification revision 2.0 [EB/OL]. <http://www.usb.org>,2000.
- [12] EZ USB FX2 technical reference manual [Z]. Cypress Semiconductor,2000.

(上接第 68 页)

偿后,系统稳定性得到提高,脱靶量得到有效降低。与文献[5]结果补偿后脱靶量 4.784 m 比较,脱靶量较小,系统相对更稳定。

## 3 结论

天线罩瞄准误差会造成导引系统稳定性下降、导弹脱靶量增加,本文建立了较为符合实际的瞄准误差模型,提出了一种基于数据表格的补偿方法,并进行了仿真实验,结果表明该方法有效地减小了脱靶量、增强了系统稳定性。

## 参考文献

- [1] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京:宇航出版社,1993.
- [2] ZARCHAN P, GRATT H. Adaptive radome compensation using dither[J]. J Guidance, Control and Dynamics, 1999,22(1):51-57.
- [3] 齐宝华,张霖. 克服天线罩瞄准线误差影响的一种鲁棒导引控制器设计方法[J]. 宇航学报,1999,20(3):

53-60.

- [4] LIN J M, CHAU Y F. Radome slope compensation using multiple-model Kalman filters[J]. J Guidance, Control and Dynamics, 1995,18(3):637-640.
- [5] 安相宇,董朝阳,王青. 一种基于 EKF 技术的天线罩瞄准误差补偿方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(15):4099-4103.
- [6] NESLINE F W, ZARCHAN P. Radome induced miss distance in aerodynamically controlled homing missiles[C]// Proceedings of AIAA Guidance and Control Conference, AIAA, New York, 1984.
- [7] 穆虹,甘伟佑,翟春惠,等. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京:宇航出版社,1996.
- [8] 王志伟,李保平,林德福,等. 天线罩误差对无线电制导导弹性能的影响[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(2):53-56,60.
- [9] 蓝伟华. 对抗空战仿真数学建模[J]. 电光与控制,2009,16(6):9-11,15.
- [10] 宋银锁. 天线罩误差斜率对导弹性能的影响与计量[J]. 制导与引信,2007,28(3):27-30.
- [11] 吴兆欣,洪信镇,李德纯,等. 空空导弹雷达导引系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>